

부산지역 실내·외 대기오염 농도수준 비교(지하역사를 기준으로)

김영태[†] · 정재원 · 정태욱
대기보전과

Comparison of Indoor Air Quality and Urban Air Quality in Busan

Young-Tae Kim[†], Jae-Won Jeong and Tae-Uk Jeong

Air Preservation Division

Abstract

Main source of Air pollution in metropolitan city like Busan is vehicle exhaust gas. And it was expected that indoor air pollution was increased by flowing it into subway station through various routes. So we investigated the characteristics of indoor air quality, urban air quality and roadside air quality by monitoring of NO₂, O₃, CO and PM10. The NO₂ concentration in Deok-cheon dong (subway station) was the highest value in the subway stations with average 0.05 ppm that was similar to that in On-cheon dong (roadside). And that in the other subway station was in the range of 0.042 to 0.047 ppm that was higher than that in Cho-ryang dong (roadside) and Jeon-po and Yeon-san dong (urban air). On the contrary to the NO₂ concentration, O₃ concentration in subway station was much lower than that in both urban and roadside area. The distribution of CO concentration was similar to that of NO₂. PM10 concentration in subway station was in the range of 46 to 55 µg/m³ that was similar to that of roadside air and urban air. It was judged that the main NO₂ source in subway station was vehicle exhaust gas according to the above results. NO₂ that flowed into subway station have always maintained higher level under the condition without photochemical reaction. So the optimum condition of ventilation system as well as height adjustment of air intake were needed to effectively control of indoor air quality in subway station. Also, it was judged that additional research about application of photochemical reaction at indoor environment and re-examining advice standard of indoor air quality about NO₂ and O₃ was needed to improve indoor air quality.

Key words : subway stations, NO₂, O₃, Photochemical reaction

서 론

1979년 환경보전법 시행 이후 상시측정을 목적으로 대기오염 측정망(19개소)이 구축되어 부산지역 대기오염도의 공개와 분석 자료 제공을 통해 대기질 관리가 이루어지고 있으며, 최근에는 지하역사, 지하상가, 백화점, 실내주차장 등 주요 활동영역이 지하공간으로 확대되고 있어 실내공기질의 중요성과 체계적 관리의 필요성이 대두되었다. 부산에는 도시철도가 1987년 1호선에 이어 현재 2, 3호선이 운행 중이며, 부산광역시교통공사에서 운영 중이던 지하역사 실내공기질 측정 장비를 부산광역시 보건환경연구원에서 관리전환 받은 후 정보화시스템(TMS)를 도입하여 지하역사 실내공기질측정망을 구축하고 2008년 8월부터

운영하고 있다. 실내환경은 대기환경과는 다르게 물리·화학적 반응에 의한 다양한 오염물질들이 좁은 공간 내에 체류하면서 시·공간적 변화에 따라 매우 다른 양상의 농도변화 특성을 보일 수 있을 것이므로 실내외 공기질 상호간의 농도변화를 고려하지 않으면 지하역사와 같은 실내공기질 관리에 많은 무리가 따를 것으로 사료된다.

따라서, 지하역사의 쾌적한 실내 환경조성에 도움이 되고자 부산지역 실내외 대기오염 농도수준을 비교하게 되었으며, 부산과 같은 대도시에서는 자동차 배출가스가 주요 대기오염원으로서 이러한 대기오염물질들이 여러 경로를 통해 지하역사내로 유입 확산되어 실내공기오염을 가중시킬 것으로 예상되므로 여러 종류의 대기오염물질 중 대표적 항목인 NO₂, O₃, CO,

[†]Corresponding author. E-mail : kyt228@korea.kr
Tel : +82-51-888-6816, Fax : +82-51-888-6817

PM10에 대하여 오염도 변화특성을 밝히고자 함이 본 조사의 목적이며, 나아가서는 실내공기질 관리의 효율적 운영과 개선방향 설정에 중요한 자료로서도 이용될 수 있을 것으로 기대한다.

경정책기본법에는 대기환경기준을 Table 1과 같이 설정해 두고 있다.

재료 및 방법

결과 및 고찰

조사기간 및 대상지점

2008년 10월부터 2009년 9월까지의 부산도시철도 3호선 역사 중 이용승객이 많은 수영역(환승), 연산역(환승), 미남역, 덕천역(환승)의 대합실에 구축 운영중인 4개소의 실내공기질측정망과 부산지역 19개소의 대기오염측정망 중 도로변 대기오염도의 실태 파악을 위해 설치된 도로변 측정소 2개소(온천동, 초량동)와 이와 가까운 지역으로 도시대기질을 대표할 수 있다고 판단되는 도시대기측정소 2개소(전포동, 연산동)를 선정하여 실내외 대기오염도 수준을 비교 평가하였다.

부산지역의 도시철도는 현재 1, 2, 3호선이 운행되고 있는데 그 중 3호선의 지하역사에서 이용승객율이 많은 수영역(환승), 연산역(환승), 미남역, 덕천역(환승)의 실내공기질측정망과 부산지역 19개소의 대기오염측정망 중 지하역사와 인접하고 주변 환경이 실내외 공기질 평가조건에 적합하다고 판단되는 도로변측정소(온천동, 초량동)와 도시대기측정소(전포동, 연산동)를 선정하여 지하역사와 도로변, 도시대기 상호간의 농도특성을 비교하였다.

조사항목 및 측정방법

조사항목은 환경부에서 지하공기질 기준물질과 대기환경기준으로 규정하고 있는 이산화질소(NO₂), 오존(O₃), 일산화탄소(CO), 미세먼지(PM10)를 대상으로 실내공기질공정시험기준과 대기오염공정시험기준에 준하였으며, 측정시간대는 지하역사의 청소, 보수 등 시설관리 등으로 실내공기질 평가에 영향을 줄 수 있는 심야시간대를 제외한 05:00 ~ 24:00시간대(20시간)의 실내외 지점별, 항목별, 시간대별 변화특성과 주요 오염물질간의 상호관계 등을 분석하였다.

실내외공기질 평가

오염도 실태

조사대상 지점에 대한 NO₂, O₃, CO는 1시간 평균, PM10은 20시간 평균값을 나타내었으며, 그 농도는 Table 2와 같은 분포를 보였다. NO₂ 농도분포를 살펴보면 지하역사의 경우 덕천동에서 평균 0.05 ppm으로 온천동의 도로변과 비슷한 수준으로 가장 높은 농도를 보였고, 그 외 수영, 연산, 미남지하역사에서도 0.042~0.047 ppm으로 도로변의 초량동과 도시대기인 전포, 연산동의 0.028~0.036 ppm보다 높은 농도를 보였다. O₃의 농도분포는 NO₂와는 반대로 도로변 0.013~0.015 ppm, 도시대기 0.024 ppm보다 훨씬 낮은 0.002~0.003 ppm의 농도분포를 보였다. CO의 농도분포는 NO₂와 같이 도로변 0.6~0.8 ppm, 도시대기 0.6 ppm보다 높은 1.8~2.6 ppm의 농도를 보였고, PM10은 도로변 45~56 µg/m³, 도시대기 45~58 µg/m³와 비슷한 46~55 µg/m³ 농도분포를 보였다.

관련기준

다중이용시설 등의 실내공기질관리법에는 NO₂, O₃과 같이 외부에 오염원이 있거나 위험도가 비교적 낮은 오염물질에 대해서는 권고기준을 설정하여 자율적으로 준수토록 유도하고 CO 와 PM10에 대하여는 유지기준을 설정하여 위반시 과태료 부과, 개선명령 등 제재 조치를 하도록 되어 있다. 그리고 환

Table 1. The standards of indoor air quality and ambient air quality.

| 항목 | 실내공기질(지하역사) | | 대기환경기준 |
|--------------------------|-------------|---------|----------------|
| | 유지기준 | 권고기준 | |
| NO ₂ (ppm) | - | 0.05 이하 | 1시간평균치 0.1 이하 |
| O ₃ (ppm) | - | 0.06 이하 | 1시간평균치 0.1 이하 |
| CO(ppm) | 10 이하 | - | 1시간평균치 25 이하 |
| PM10(µg/m ³) | 150 이하 | - | 24시간평균치 100 이하 |

Table 2. The concentration ranges of NO₂, O₃, CO and PM10 in indoor and outdoor sites

| 구분 | NO ₂ (ppm) | | | O ₃ (ppm) | | | | |
|----|-----------------------|---------|-------|----------------------|-------------|-------|-------------|-------------|
| | Mean | Std.dev | Range | Mean | Std.dev | Range | | |
| 실내 | 수영역 | 0.042 | 0.015 | 0.004~0.133 | 0.002 | 0.002 | 0.001~0.024 | |
| | 지하 | 연산역 | 0.042 | 0.016 | 0.007~0.129 | 0.003 | 0.003 | 0.001~0.048 |
| | 역사 | 미남역 | 0.047 | 0.017 | 0.001~0.113 | 0.003 | 0.003 | 0.001~0.037 |
| | | 덕천역 | 0.050 | 0.015 | 0.008~0.112 | 0.003 | 0.003 | 0.001~0.052 |
| 실외 | 도로 | 온천동 | 0.055 | 0.020 | 0.007~0.206 | 0.015 | 0.012 | 0.001~0.076 |
| | | 초량동 | 0.036 | 0.015 | 0.002~0.100 | 0.013 | 0.009 | 0.001~0.061 |
| | 도시 | 전포동 | 0.035 | 0.020 | 0.001~0.172 | 0.024 | 0.016 | 0.001~0.118 |
| | | 연산동 | 0.028 | 0.015 | 0.002~0.125 | 0.024 | 0.017 | 0.001~0.100 |

| 구분 | CO(ppm) | | | PM10(μg/m ³) | | | | |
|----|---------|---------|-------|--------------------------|---------|-------|--------|--------|
| | Mean | Std.dev | Range | Mean | Std.dev | Range | | |
| 실내 | 수영역 | 1.9 | 0.6 | 0.3~4.1 | 51 | 17 | 20~111 | |
| | 지하 | 연산역 | 1.9 | 0.9 | 0.1~5.6 | 46 | 15 | 16~106 |
| | 역사 | 미남역 | 1.8 | 0.6 | 0.1~5.1 | 54 | 23 | 15~148 |
| | | 덕천역 | 2.6 | 1.1 | 0.1~6.2 | 55 | 17 | 20~127 |
| 실외 | 도로 | 온천동 | 0.8 | 0.3 | 0.1~3.9 | 45 | 22 | 17~205 |
| | | 초량동 | 0.6 | 0.2 | 0.2~3.0 | 56 | 26 | 21~231 |
| | 도시 | 전포동 | 0.6 | 0.3 | 0.1~4.0 | 58 | 28 | 19~222 |
| | | 연산동 | 0.6 | 0.3 | 0.1~3.7 | 45 | 17 | 22~143 |

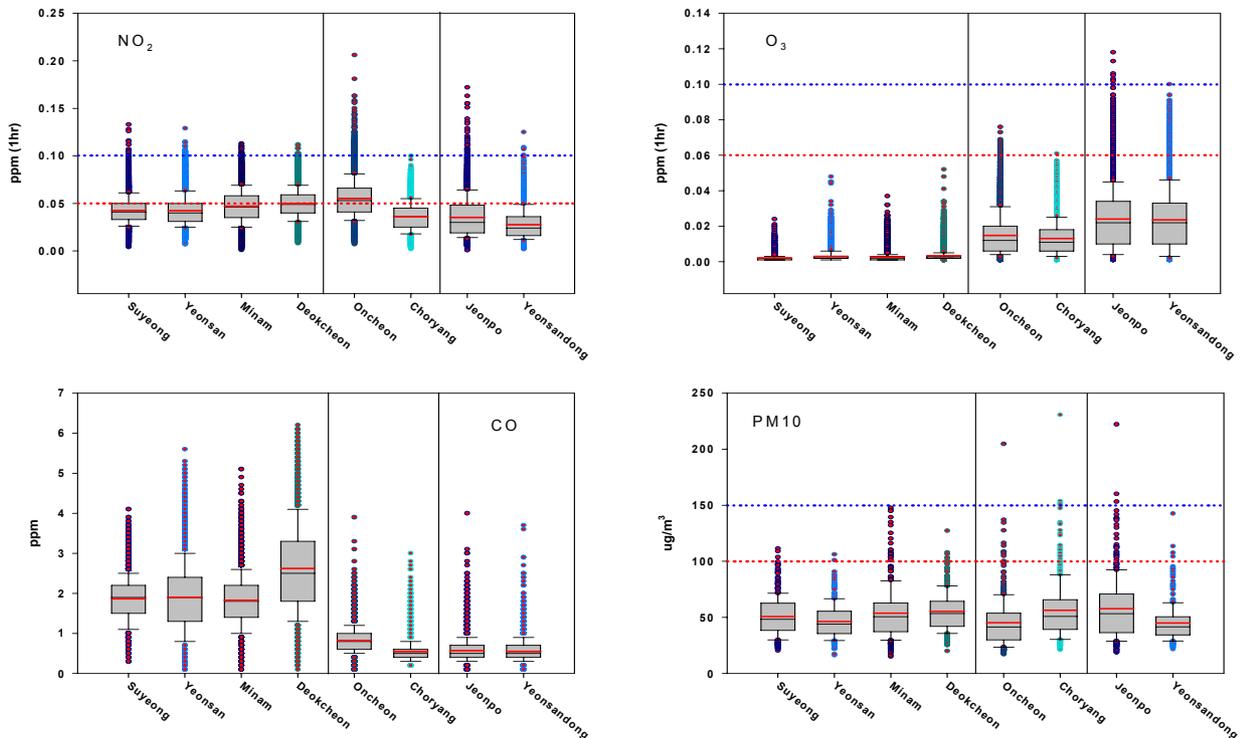


Fig. 1. The distributions of NO₂, O₃, CO and PM10.

항목별 특성

수영, 연산, 미남, 덕천동 지하역사와 온천·초량의 도로변 및 전포·연산동의 도시대기오염물질 중 NO₂, O₃, CO는 1시간 평균, PM10은 20시간평균의 항목별 농도분포를 박스그래프를 이용하여 아래로부터 5(%), 50(%), 95(%), 산술평균(실선)을 Fig. 1과 같이 표시하였다.

NO₂ (이산화질소)

NO₂는 대기 중에서 NO의 산화를 통해 형성되며, NO는 도시 대기에서 차량배기가스 등에 의해 주로 발생하여 휘발성유기화합물(VOCs)과 복잡한 광화학반응에 의해 대기중 오존을 형성하는 중요한 역할을 하고 있다.

지점별 NO₂의 지하역사 연평균농도는 도로변의 온천동에 비해 낮았으나 초량동과 도시대기의 전포동과 연산동보다 높은 농도를 보였고, 1시간 평균농도는 실내공기 권고기준치인 0.05 ppm을 초과하는 경우가 빈번히 발생하였는데 수영역에서 24.1%, 연산역 24.5% 미남역 40.1%, 덕천역 46.8%의 높은 초과율을 보였다.

그리고 실외 대기환경기준인 0.1 ppm을 넘어서는 경우도 있었는데 수영역 0.2%, 연산역 0.4% 미남역 0.4%, 덕천역 0.2%의 초과율을 보여 NO₂에 대한 대책이 시급한 것으로 나타났다. 연중 최고농도(1시간 평균)는 수영역 0.133 ppm, 연산역 0.129 ppm, 미남역 0.113, 덕천역 0.112 ppm으로 나타났고, 도로변인 온천동 0.206 ppm, 초량동 0.100 ppm, 도시대기인 전포동 0.172 ppm, 연산동 0.125 ppm이었다. 연평균농도는 수영역 0.042 ppm, 연산역 0.042 ppm, 미남역 0.047 ppm, 덕천역 0.050 ppm 으로 덕천역에서 지하역사 중 가장 높은 농도를 보여 온천동>덕천역>미남역>연산역=수영역>초량동>전포동>연산동의 오염도순으로 실내공간인 지하역사가 도로변인 온천동을 제외하고는 초량동과 도시대기의 전포동, 연산동의 실외보다 높은 농도를 나타내었다.

O₃ (오존)

O₃과 같은 광산화제를 발생시키는 대표적 원인물질로 알려져 있는 NO_x의 광화학반응은 NO가 NO₂로 산화되는 것으로 이 반응은 느린 반응이지만 대기 중 NO가 충분히 존재하면 NO₂ 농도는 선형적으로 증가하게 된다. 증가된 NO₂는 대기중에서 태양복사에 의해 광해리되어 광화학 산화제의 대표적인 물질인 오존을 생성하게 된다.

이러한 O₃의 실내외 지점별 농도분포를 보면 연중 최고농도(1시간 평균)는 수영역에서 0.024 ppm, 연산역 0.048 ppm, 미남역 0.037, 덕천역 0.052 ppm을 보였고, 도로변의 온천동 0.076 ppm, 초량동 0.061 ppm, 도시대기인 전포동 0.118 ppm, 연산동 0.100 ppm으로 실내 지하역사의 경우 권고기준 0.06 ppm이하를 크게 밑도는 수준이었다. 연평균농도 역시 수영역 0.002 ppm, 연산·미남·덕천역에서 0.003 ppm으로 도로변의 온천동 0.015 ppm, 초량동 0.013 ppm, 도시대기의 전포동 0.024 ppm, 연산동 0.024 ppm 보다는 훨씬 낮은 농도를 보이

면서 도시대기>도로변>지하역사의 오염도순이었다. 이와 같이 O₃이 실외보다 훨씬 낮은 농도를 보이는 것은 지하역사와 같이 태양 빛이 없는 실내공간에서는 일어나지 않는 광화학반응의 발생여부와 많은 관련성이 있는 것으로 사료된다.

CO (일산화탄소)

CO는 무색, 무취, 무미의 기체로서 연료 중 탄소의 불완전연소로 생성되는 1차 오염물질로서 도시간선도로변의 가장 중요한 배출원인 자동차에 의한 고농도 CO는 교통체증이 심한 도심에서 많이 발생한다. 지점별 CO의 농도분포에서 연중 최고농도(1시간 평균)는 수영역에서 4.1 ppm, 연산역 5.6 ppm, 미남역 5.1 ppm, 덕천역 6.2 ppm을 보였고, 도로변대기의 온천동 3.9 ppm, 초량동 3.0 ppm, 도시대기인 전포동 4.0 ppm, 연산동 3.7 ppm으로 지하역사의 경우 실내공기질 권고기준 10 ppm, 대기환경기준 25 ppm을 크게 밑도는 수준이었다. 연평균 농도는 수영·연산역 1.9 ppm, 미남역 1.8 ppm, 덕천역 2.6 ppm으로 도로변의 온천동 0.8 ppm, 초량동 0.6 ppm, 도시대기의 전포·연산동 0.6 ppm 보다 높은 농도수준으로 지하역사>도로변>도시대기의 오염도순이었다. 그리고 지하역사간의 평균농도는 비슷한 수준이었으나 덕천역의 경우 가장 높은 농도를 보였는데, 이는 역사 아래 층에 있는 지하 주차장의 자동차 주정차에 의한 영향이 큰 것으로 사료된다.

이러한 CO는 대기 중의 다른 오염물질과 유해한 화학반응을 일으키지도 않으며, 물에 난용성이기 때문에 수용성가스와는 달리 습도에도 거의 영향을 받지 않고 다른 물질에 흡착현상도 나타내지 않는 물리·화학적 특징에 의해, 지하역사의 경우 실외와 다르게 원활한 공기확산이 되지 않는 상태에서 체류하면서 농도가 축적되어 도로변과 도시대기보다 상대적 높은 농도를 나타내는 것으로 보인다.

PM10 (미세먼지)

PM10은 화석연료의 연소, 자동차의 배출가스 및 화학물질의 제조과정 등에서 발생하거나 아황산가스나 휘발성유기화합물 등 의 응축과정을 거쳐 가스상에서 입자상으로 변환된 2차 분진이 대부분인데 지하역사에 유입되는 것은 자동차 배출가스와 차량운행 중 도로변에서 재비산되는 먼지가 주를 이루고 있다.

이러한 PM10의 지점별 농도분포에서 연중 최고농도(20시간 평균)는 실내인 수영역에서 111 µg/m³, 연산역 106 µg/m³, 미남역 148 µg/m³, 덕천역 127 µg/m³을 보였고, 도로변의 온천동 205 µg/m³, 초량동 231 µg/m³, 도시대기인 전포동 222 µg/m³, 연산동 143 µg/m³으로 지하역사의 경우 실내공기질 유지기준 150 µg/m³을 만족하였는데, 이 중 미남역사의 상대적 높은 농도는 도시철도 4호선(미남-안평)의 연장공사 작업의 영향으로 판단되며, 실외의 도로·도시대기 최고농도는 2009년 3월 17일 발생한 부산지역의 황사에 의한 것으로 이 날의 실내외 지점별 평균농도는 지하역사인 수영역 80 µg/m³, 연산역 67 µg/m³, 미남역 80 µg/m³, 덕천역 127 µg/m³이었고, 도로변인

온천동 205 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 초량동 231 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 도시대기인 전포동 222 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 연산동 143 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 황사의 영향은 실외보다 적은 것으로 나타났다. 그리고 연평균농도는 수영역 51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 연산역 46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 미남역 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 덕천역 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 도로변의 온천동 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 초량동 56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 도시대기의 전포 58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 연산동 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 실내외 모두 비슷한 농도수준을 보였다.

시간대별특성

도시대기질의 경우 하루 중 대기오염농도변화는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 O_3 를 제외하고는 각종 생산 활동의 시작과 함께 차량 통행량이 많아지는 출근시간대부터 증가하다가 13:00 시간인 낮시간대에 다소 감소 후 퇴근시간대인 19:00시간대에 다시 증가하는 변화를 보였다. 이러한 현상은 실내 지하역사의 경우도 마찬가지로 출근시간대인 08:00~10:00와 퇴근시간대인 16:00~21:00 시간대에 높은 농도를 보이는 것은 도시대기질과 비슷한 경향을 보였다.

NO_2

도로변과 도시대기의 NO_2 는 출근시간대인 07:00시간대부터 상승하여 09:00시간대에 최고농도를 보이다가 13:00~14:00 시간대에 최저농도를 나타낸 후, 퇴근시간대인 18:00~20:00 시간대에 다시 높은 농도를 보이는 특성을 보였는데, 지하역사의 경우는 도시철도 운행이 시작되는 05:00부터 출근시간대인 09:00시간대까지 실외와 같은 상승을 보이다가 그 이후 낮시간대에는 실외와 달리 큰 변화없이 완만한 상승을 보이면서 퇴근 시간대인 19:00시간대 이후 급격히 낮아지는 도시대기질과는 다른 특징을 보였다. 이러한 낮시간대의 큰 변화없이 완만하게 높은 농도를 유지하고 있는 것이 지하역사의 평균농도를 높이는 원인으로 작용하는 특징으로 볼 수 있었다. 이와 같이 NO_2 의 경우 도로변 도시대기에서는 오전시간대(07:00~09:00)의 증가 후 낮시간대 감소하여 저녁시간대에 다시 증가하는 광화학반응에 의한 오존의 생성과 소멸과 관련한 특성을 보이는 반면, 지하역사의 실내인 경우 오전시간대에 상승을 보이다가 낮 시간대에는 큰 변화없이 높은 농도를 보였다.

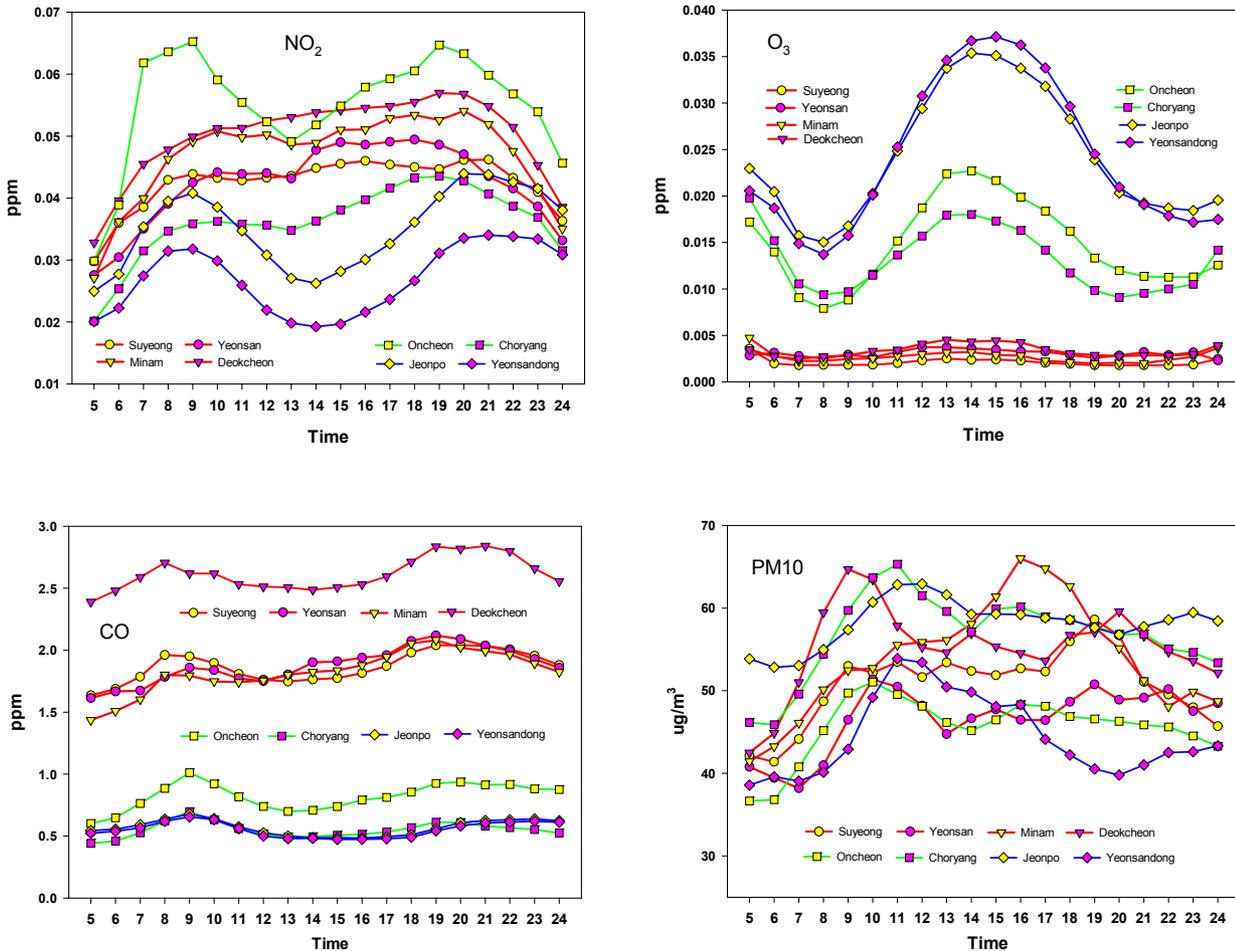


Fig. 2. Time-based variations of NO_2 , O_3 , CO and PM_{10} .

O₃

대기 중에서 오존은 태양빛, 자동차 배출가스인 질소산화물과 휘발성유기화합물에 의해 일어나는 복잡한 광화학반응으로 생성된다. 이러한 O₃은 실내외 모두 출근시간대인 07:00~09:00시간대에 낮은 농도를 보이다가 광화학반응이 활발한 14:00~16:00 시간대에 가장 높은 농도를 보이면서 일몰 후 퇴근시간대인 20:00시간대에 점차적으로 낮아지는 특성을 보였는데, 실내외의 O₃ 농도수준 차이는 매우 컸지만 시간대별 변화는 비슷한 경향을 보였다.

CO

출근시간대인 08:00~09:00 시간대에 높은 농도를 보이다가 13:00시간대에 낮은 농도를 보인 후 퇴근시간대인 19:00시간대에 다시 상승하는 변화를 보였다. 이러한 변화는 실내외 모두 비슷한 경향을 보였는데, 지하역사에서 도로변, 도시대기의 농도보다 전시간대 높은 것으로 나타났다. 상대적으로 높은 농도를 보인 덕천역의 경우 다른 지점에 비해 많은 차이를 두고 있었는데 이는 다른 역사와 달리 지하역사와 연계된 지하상가와 그 아래 지하층에 주차장이 있어 차량의 공회전시 발생하는 CO의 영향으로 판단되며 이에 대한 주차장과 지하상가의 환기시설관리가 함께 이루어져야할 것으로 사료된다.

PM₁₀

출근시간대인 09:00 시간대에 높은 농도를 보이다가 12:00~13:00시간대에 낮은 농도를 보인 후 퇴근시간대인 19:00에 다시 상승하는 변화를 보이면서 시간대별 변화는 실내외 모두 비슷한 경향을 보였는데 미남역사의 16:00시간대의 높은 농도를 보이고 있는 것은 역사 지하 아래 확장 신설중인 도시철도 4호선(미남-안평)의 철로궤도설치작업 등 공사의 영향에 의한 것으로 사료되며, 20:00시간대 이후에는 지하역사와 도로변은 감소를 보이는 반면에 도시대기의 경우는 상승세를 보였다. 이는 도로변과 지하역사의 시간대별 관련성이 더 많다는 것을 의미하는 것으로 보여진다.

실내공기질의 특징

도시대기질은 풍향, 풍속, 온도, 상대습도 등 기상조건에 의한 공기질의 확산과 태양광에 의한 광화학반응의 생성 메카니즘 등에 의하여 많은 변화를 가져오는데, 실내공기질의 경우 기상조건과 광화학반응이 실외와 다르게 작용하게 됨에 따라, 실내오염물질에 대한 영향도 클 것으로 사료된다. 이러한 실내오염물질 중 앞 장에서 조사한 바와 같이 지하역사의 NO₂는 주배출원인 차량의 영향을 가장 많이 받는 도로변의 온천동보다는 다소 낮은 농도였지만 도시 대기의 전포동과 연산동에 비하여 높은 농도를 보이면서 지하역사별로 24.1~46.8%의 실내공기 권고기준의 높은 초과율을 보였다. 이에 반하여 오존의 경우는 도로변과 도시대기에 비해 약 6~8배의 낮은 농도를

보였다. 이러한 농도특징에서 NO와 NO₂의 관계를 살펴보면 Table 3에서 보는 바와 같이 지하역사와 도로변에서는 연평균 농도 범위가 NO 0.055~0.099 ppm, NO₂ 0.036~0.055 ppm으로 NO의 농도가 높은 반면, 도시대기의 경우는 NO 0.016~0.019 ppm, NO₂ 0.028~0.035 ppm의 범위에서 지하역사와 도로변과는 반대로 NO₂가 NO에 비해 높은 농도를 보였다.

여기서 실내외 NO와 NO₂의 관계에서 주목할 것은 Fig. 3에서 보듯이 NO의 경우 도로변과 지하역사에서 도시대기와 달리 높은 농도의 특성을 보였는데 이는 차량에서 발생한 NO가 짧은 거리의 도로변에 직접적인 영향을 주면서 환기시설에 의해 실내공간으로 유입된 결과라 볼 수 있으며, 이와 반대로 도시대기에서 낮은 NO 농도는 측정지점(대기측정소)이 도로변에서 떨어진 지상 약 10 m 이상의 위치에 설치되어 있음에 따라, 차량통행이 많은 도로변의 NO가 측정지점까지의 이동과정에서 NO가 NO₂로 산화된 후 광화학반응 등에 의하여 O₃의 생성과정에 소모된 결과로 사료된다.

이러한 과정에서 NO는 대기 중의 산소에 의해 NO₂로 산화되고, 생성된 NO₂는 파장 424nm 이하의 자외선과 짧은 가시광선인 태양복사에너지에 의하여 NO와 O로 광분해된 후 다시 대기 중 O₂와 결합하여 O₃을 생성한다. 그러나 실내의 경우 태양광에 의한 질소산화물의 순환이 이루어지지 않는 상황에서 도로변 NO가 지하역사로 유입된 후 O₂와 반응하여 생성된 NO₂는 태양광이 없는 실내에서 NO와 O로 광분해가 일어나지 않아 NO₂의 경우 소멸없이 유지하게 되면서 O₃의 생성을 저하시키는 역할을 하게 되어 지하역사의 경우 NO₂의 높은 농도와 낮은 O₃의 농도를 보이는 것으로 추정된다.

이러한 결과에 대하여 시간대별 농도변화를 살펴보면 Fig. 4에서와 같이 NO₂의 경우 도로변과 도시대기와는 달리 지하역사에서 낮시간대에는 큰 변화없이 완만하게 높은 농도를 유지하였고, O₃의 경우 시간대별 변화는 비슷한 경향을 보이면서 농도는 도로변과 도시대기에 비하여 크게 낮은 수준을 보였다.

여기서 NO₂의 경우 도로변과 도시대기에서는 오전시간대(07:00~09:00) 증가 후 낮시간대 감소하여 저녁시간대에 다시 증가하는 광화학반응에 의한 오존의 생성과 소멸과 관련한 특성을 보인 반면, 지하역사의 실내에서는 오전시간대에 상승을 보이다가 낮시간대에 실외와 달리 감소를 보이지 않고 큰 변화없이 높은 농도를 유지하다가 20:00시간대 이후부터 감소현상을 보였다. 이러한 결과가 지하역사의 NO₂ 평균농도를 높이는 원인으로 작용하면서 실외 대기질과의 다른 특징으로 볼 수 있었다.

따라서, 지하역사의 낮시간대 NO₂의 높은 농도는 주 발생원인 차량 배출가스로서 도로변 환기시설 가동에 의해 지하공간으로 유입된 NO₂는 도로변 농도수준을 유지하면서 태양광이 없는 환경에서 O₃ 발생에 의한 소멸이 미세하여 높은 농도를 유지하는 것으로 판단된다.

Table. 3 The distribution of NO and NO₂ concentrations in indoor and outdoor sites

| 구분 | NO(ppm) | | | NO ₂ (ppm) | | | | |
|----|---------|---------|-------|-----------------------|-------------|-------|-------------|-------------|
| | Mean | Std.dev | Range | Mean | Std.dev | Range | | |
| 실내 | 수영역 | 0.073 | 0.049 | 0.001-0.520 | 0.042 | 0.015 | 0.004-0.133 | |
| | 지하 | 연산역 | 0.055 | 0.053 | 0.001-0.614 | 0.042 | 0.016 | 0.007-0.129 |
| | 역사 | 미남역 | 0.085 | 0.074 | 0.001-0.790 | 0.047 | 0.017 | 0.001-0.113 |
| | | 덕천역 | 0.087 | 0.067 | 0.001-0.490 | 0.050 | 0.015 | 0.008-0.112 |
| 실외 | 도로 | 온천동 | 0.099 | 0.082 | 0.003-1.094 | 0.055 | 0.020 | 0.007-0.206 |
| | | 초량동 | 0.059 | 0.056 | 0.001-0.709 | 0.036 | 0.015 | 0.002-0.100 |
| | 도시 | 전포동 | 0.019 | 0.039 | 0.000-0.499 | 0.035 | 0.020 | 0.001-0.172 |
| | | 연산동 | 0.016 | 0.031 | 0.001-0.438 | 0.028 | 0.015 | 0.002-0.125 |

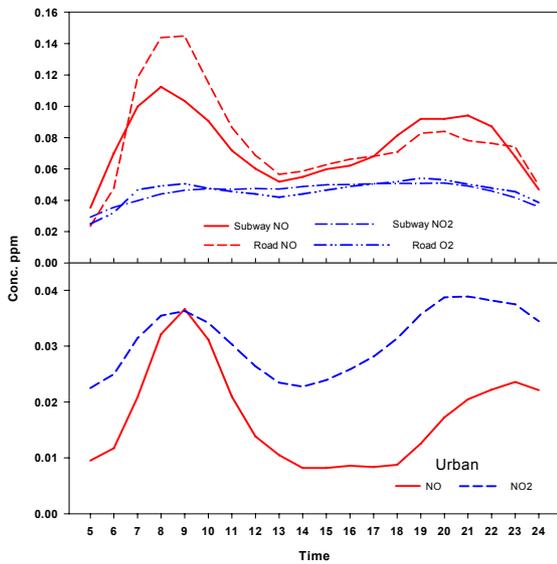


Fig. 3. Time-based variations of NO and NO₂ concentrations in indoor and outdoor sites.

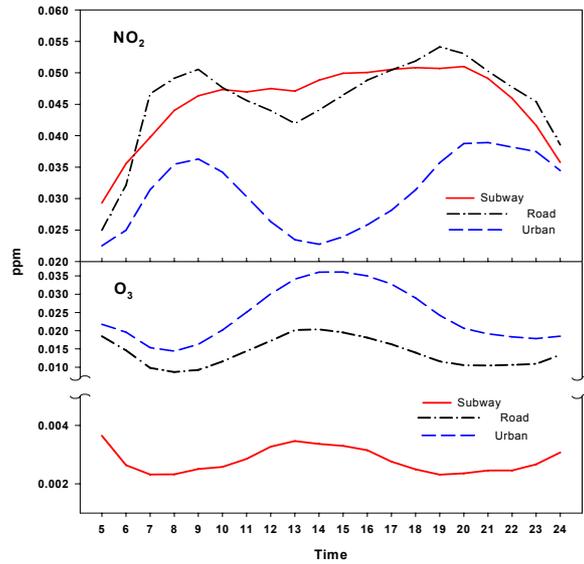


Fig. 4. Time-based variations of NO and O₃ concentrations in indoor and outdoor sites.

연구결과 지하역사 실내공기질의 효율적 관리를 위하여는 오염물질 발생원의 관리, 환기 및 정화를 위한 환기시설과 공조 시스템의 최적 상태에서 운영과 함께 발생원과의 거리 감쇠 효과를 보기 위한 도로단에 설치되어 있는 도시철도 환기구 높이의 상향조정이 필요하며, 대기환경과는 달리 태양광에 의한 광화학반응이 일어나지 않는 실내 지하역사의 경우 NO₂와 O₃ 등과 같이 여러 요인에 의해 2차 오염물질로 생성되어 오염 물질의 농도에 많은 변화를 가져올 수 있는 주변 환경에 대한 관리도 필요할 것으로 판단된다.

따라서, 대기 중의 광범위하고 복잡한 과정에서 일어나는 광분해에 의한 광화학 반응조건을 지하역사와 같은 실내공간에 적용시키는 인위적인 방법으로 자연광을 실내로 유입하는

채광방법과 친환경시스템의 자연광 발생 조명장치에 대한 연구개발 등 새로운 연구가 필요할 것이다. 그리고 NO₂의 경우 권고기준을 초과하는 경우가 많은 반면, O₃은 크게 미달하고 있다.

이와 같이 광화학반응과 깊은 관계가 있는 NO₂의 경우 대기 환경기준(1시간 평균 0.1 ppm 이하)보다 엄격한 실내공기 권고기준(0.05 ppm 이하)을 유지하기에는 많은 무리가 있을 것으로 생각되므로 지속적인 실내공기의 오염도 실태조사와 주변 환경의 특성 등을 세밀하게 파악하여 권고기준치를 재검토 해 보는 것도 바람직할 것으로 판단된다.

결 론

부산지역의 실내외 대기오염도 농도수준 비교를 위하여 부산도시철도 3호선 지하역사중 이용승객이 많은 수영역, 연산역, 미남역, 덕천역 4개지점의 실내공기질측정망과 실외지역으로는 대기오염측정망 중 지하역사와 인접하거나 도로변 대기오염도의 실태파악을 할 수 있는 도로변 측정소의 온천동과 초량동 2개소와 이와 가까운 지역으로 도시대기질을 대표할 수 있다고 판단되는 전포동과 연산동의 도시대기측정소 2개소를 선정하여 대기오염농도수준을 비교 평가하였다.

1. 실내외 조사대상 지점에 대한 항목별 평균농도 특성은 NO₂ 농도분포는 지하역사의 경우 덕천역에서 평균 0.05 ppm으로 온천동 도로변과 비슷한 수준으로 가장 높은 농도를 보였고, 그 외 수영, 연산, 미남지하역사에서 0.042~0.047 ppm, 도로변 초량동과 도시대기의 전포, 연산동 0.028~0.036 ppm의 실외보다 높은 농도를 보인 반면, O₃의 경우 NO₂와는 상반된 도로변 0.013~0.015 ppm, 도시대기 0.024 ppm보다 훨씬 낮은 0.002~0.003 ppm의 농도분포를 보였다. 그리고 CO의 농도분포는 도로변 대기 0.6~0.8 ppm, 도시대기 0.6 ppm보다 높은 1.8~2.6 ppm의 농도를 보였고, PM10은 도로변 45~56 μg/m³, 도시대기 58~45 μg/m³와 비슷한 46~55 μg/m³ 농도분포를 보였다.

2. 지하역사의 NO₂(1시간 평균)는 실내공기 권고기준치인 0.05 ppm을 넘어서는 잦은 초과로 수영역 24.1%, 연산역 24.5% 미남역 40.1%, 덕천역 46.8%의 높은 초과율을 보였고, 대기환경 기준인 0.10 ppm을 넘어서는 경우도 있어 NO₂에 대한 대책이 시급한 것으로 나타났다.

3. O₃의 연중 최고농도(1시간 평균)는 지하역사인 수영역에서 0.024 ppm, 연산역 0.048 ppm, 미남역 0.037, 덕천역 0.052 ppm으로 도로변의 온천동 0.076 ppm, 초량동 0.061 ppm과 도시대기의 전포동 0.118 ppm, 연산동 0.100 ppm에 비해 크게 낮은 수준으로 도시대기>도로변>지하역사의 순으로 실내외 광화학반응의 유무에 따른 차이로 추정할 수 있었다.

4. CO의 연중 최고농도(1시간 평균)는 지하역사인 수영역에서 4.1 ppm, 연산역 5.6 ppm, 미남역 5.1 ppm, 덕천역 6.2 ppm으로 도로변의 온천동 3.9 ppm, 초량동 3.0 ppm, 도시대기인 전포동 4.0 ppm, 연산동 3.7 ppm에 비해 높은 농도수준을 보였으나, 지하역사의 경우 권고기준 10 ppm, 대기환경 기준 25 ppm에는 크게 밑도는 수준이었다. 실외에 비해 상대적으로 높은 농도는 CO의 물리화학적 안정된 성질과 실내외 조사 지점간 거리 차이에 의한 영향도 크게 작용하는 것으로 사료된다.

5. PM10의 연중 최고농도(20시간 평균)는 지하역사인 수영역 111 μg/m³, 연산역 106 μg/m³, 미남역 148 μg/m³, 덕천역 127 μg/m³으로 실내공기 유지기준 150 μg/m³을 만족하

였고, 연평균농도는 수영역 51 μg/m³, 연산역 46 μg/m³, 미남역 54 μg/m³, 덕천역 55 μg/m³으로 도로변의 온천동 45 μg/m³, 초량동 56 μg/m³, 도시대기의 전포 58 μg/m³, 연산동 45 μg/m³과 큰 차이없이 비슷한 농도수준을 보였다.

6. 실내공간의 시간대별 변화에서 NO₂는 대기질과 달리 도시철도 운행이 시작되는 05:00시간대부터 09:00시간대까지 상승하다가 그 이후 낮 시간대에는 큰 변화없이 완만한 상승을 보인 후 19:00시간대 이후 급격히 낮아지는 특징을 보였는데 이러한 낮시간대에 높은 농도를 유지하고 있는 결과가 지하역사의 평균농도를 높이는 원인으로 작용하는 중요한 특징으로 볼 수 있었다. 그 외 O₃, CO, PM10은 도시대기질과 비슷한 시간대별 변화를 보였다.

7. NO와 NO₂의 경우 지하역사와 도로변에서 연평균농도 범위가 NO 0.055~0.099 ppm, NO₂ 0.036~0.055 ppm으로 NO의 농도가 높은 반면, 도시대기의 경우 NO 0.016~0.019 ppm, NO₂ 0.028~0.035 ppm으로 NO₂가 NO에 비해 높은 농도를 보였는데, 이는 차량에서 발생한 NO가 짧은 거리의 도로변에 직접적인 영향을 주면서 환기시설에 의해 실내공간으로 유입된 결과라 볼 수 있으며, 이와 반대로 도시대기에서 낮은 NO 농도는 측정지점이 도로변에서 떨어져 지상 약 10 m의 위치에 설치되어 있어 도로변 NO의 이동과정에서 광화학반응에 의한 NO가 NO₂로 산화되어 O₃의 생성과정에 소모된 결과로 사료된다.

8. 낮시간대 NO₂의 높은 농도는 주 발생원인 차량 배출가스로서 도로변 환기시설 가동에 의해 지하공간으로 유입된 NO₂는 도로변 농도수준을 유지하면서 지하역사로 유입되어 태양광에 의한 광화학반응이 없는 환경에서 오존발생에 의한 소멸이 미세하여 높은 농도를 유지하는 것으로 이러한 결과가 지하역사의 NO₂ 평균농도를 높이는 원인으로 대기질과의 다른 특징으로 보여진다.

9. 시민들의 이용이 많은 지하역사 실내공기질의 효율적 관리를 위하여 환기시설과 공조시스템의 최적상태에서 운영 관리는 물론, 도로단에 설치되어 있는 도시철도 환기구 높이의 상향조정과 외부 공기유입부 주변 및 지하역사 출입구에 나무를 식재하여 도로변 차량 배출가스과 같은 오염물질의 직접적인 차단효과에 의해 오염공기의 흐름 방향을 바꾸어지게 하므로써 공기질 개선에도 기여할 수 있을 것으로 판단되며, 나아가서는 실외 대기 중에서 일어나는 광화학반응조건을 지하역사와 같은 실내공간에서도 적용시키는 인위적인 방법으로 자연광을 실내로 유입하는 채광방법과 친환경시스템의 자연광 조명장치에 대한 새로운 연구개발의 필요성과 NO₂와 O₃에 대하여는 실내공기질 권고기준을 재검토 해보는 것도 바람직할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 전의찬, 광화학산화제의 단기예측모형개발, 서울대학교 pp. 8 ~21(1996).
2. 송희봉, 대구지역 지하철역사의 실내공기질 특성평가 대구광역시보건환경연구원, 영남대학교 환경공학과(1999).
3. 윤태호, 다중이용시설 실내공기질 항목중 일산화탄소와 질소산화물의 분포특성에 관한 연구 서울특별시보건환경연구원(2007).
4. 김윤신, 실내공기질 연구의 현황과 전망, 한양대학교 환경 및 산업의학연구소(1999).
5. 김희강, 대기오염개론, 동화기술 pp.45-66(1993).
6. 환경부, 지하역사 공기질 개선 5개년 대책(2008-2012). (2008).
7. 환경부, 실내공간 실내공기오염특성 및 관리방법 연구, 서울시립대학교(2002).